第46卷 第8期
2023年8月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 8
Aug. 2023

西北"水三线"生态经济体系与调控模式研究

党小虎[1]， 邓铭江[2,3]， 李 鹏[3,4]， 曹小曙[5,6]， 隋博洋[1]，
时 鹏[3,4]， 张 甜[5,6]， 艾泽民[7]

（1. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054；2. 新疆寒旱区水资源与生态水利工程研究中心，新疆 乌鲁木齐 830000；3. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；4. 旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业局重点实验室，陕西 西安 710048；5. 陕西师范大学西北国土资源研究中心，陕西 西安 710119；6. 陕西师范大学西北城镇化与国土环境空间模拟重点实验室，陕西 西安 710119；7. 西安科技大学测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054）

摘 要：在黄河流域生态保护和高质量发展以及新时代推进西部大开发形成新格局的战略背景下，地跨黄河流域和内流河流域的西北"水三线"，如何顺应生态本底、资源禀赋和经济社会发展水平，落实2个重大战略，因地制宜构建区域特色的生态经济体系框架及协调发展模式，是当前亟待解决的重大问题。基于已有的生态经济理论成果，遵循"绿水青山就是金山银山"发展理念和"人与自然和谐共生"的系统理念，构建西北"水三线"生态经济体系概念框架，识别体系子系统之间的相互作用关系与作用路径，基于核心理论和基础评价，提出适应西北"水三线"生态经济系的四大发展模式和四大生态经济枢纽区建设，进行生态农业建设布局与农业发展模式总结，明确生态经济枢纽区的城乡统筹发展基本路径。研究认为西北"水三线"生态经济体系概念框架可为建设西北内陆型生态经济枢纽区及其核心模式、实现区域生态-经济协调发展提供关键理论支撑。

关 键 词：西北"水三线"；生态经济体系；调控模式；区域生态-经济协调发展
文章编号：1000-6060(2023)08-1355-11(1355~1365)

生态经济理念是人类反思人与自然关系的产物。从20世纪60—70年代的生态经济学理论[1-2]到90年代被广泛接受的可持续发展理念，从21世纪初生态系统服务研究兴起[3]、千年生态系统评估出炉[4]到2016—2030年全球可持续发展目标（SDGs）确立，再到不同视角下诞生的可持续性科学[5-8]、可持续发展经济学以及人类-自然耦合系统[9]或社会-生态耦合系统[10-11]等一系列重要理论成果，每一次认识上的突破，都为人类社会生存和可持续发展的有效决策提供了理论基础。

经历了四十多年的快速发展，中国生态经济理论体系不断完善。2012年国家将"生态文明建设"提升到与政治、经济、文化、社会建设并列的战略高度，提出了中国特色社会主义事业"五位一体"的总体战略布局，并作出了一系列生态文明建设的战略部署，实施京津冀协同发展、长江经济带发展、黄河流域生态保护和高质量发展以及新时代推进西部大开发形成新格局等战略决策。2018年3月11日生态文明被写入宪法，同年5月18—19日召开的全国生态环境保护大会标志着中国生态文明理论与认识达到了一个全新高度。

在几十年积累的重大成果支撑下，生态文明建设实践方面不断推进国家和地方层面的生态省、生态市、生态县建设，创建了不同层次和规模的可持续发展实验区、国家可持续发展议程创新示范区、生态农业试点示范县、生态工业示范园区等[12-13]。

收稿日期：2022-10-31； **修订日期：**2022-11-27
基金项目：中国工程院重点咨询项目（2020-XZ-15）；宁夏流域水土保持生态-经济协同治理技术与发展模式研究项目资助
作者简介：党小虎（1968-），男，博士，教授，主要从事生态经济、生态修复与水土保持等方面的研究. E-mail: dangxh2018@xust.edu.cn
通讯作者：邓铭江（1960-），男，博士，教授级高级工程师，中国工程院院士，主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理等方面的研究. E-mail: xjdmj@163.com

生态建设取得了显著的生态经济效应[14-16]，尤其是生态脆弱区[17-18]。2018年8月开展的第三次全国国土调查（简称“三调”）结果证实2008—2018年10 a间，生态功能较强的林地、草地、湿地、河流水面、湖泊水面等地类合计净增加了17.33×10⁴ km²，生态建设取得了积极成效。

但同时一些地方生态建设盲目性、生态布局不合理的问题比较突出。“三调”结果显示，年降水量400 mm以下地区新增乔木林地3.27×10⁴ km²、灌木林地12×10⁴ km²；年降水量200 mm以下地区约4.33×10⁴ km²草地转变为林地，这些做法与自然生态格局不相符合。另外，10 a间全国新增建设用地8.53×10⁴ km²，同期城镇化率增加了14.37%，每增加1%城镇化率的耕地代价为0.59×10⁴ km²，占补平衡制度落实面临严峻挑战。中国的自然地域分异显著，生态本底和自然资源禀赋差异大，经济发展水平层次不齐，并没有也不可能有统一的标准体系用以指导全国各地的生态文明建设和生态经济协调发展，各地需要因地制宜构建符合当地自然生态和经济社会发展规律的生态建设指导体系。

西北“水三线”由“胡焕庸线”“阳关线”和“奇策线”及其所在的区域共同构成[19]，覆盖新疆、宁夏全域及青海、甘肃、陕西、内蒙古的部分区域，面积为345×10⁴ km²，占全国国土面积的35.9%。地区生态本底脆弱，生态经济表现为水-土资源失衡、水-矿资源失衡、水-生关系失调、水-沙关系失调和水-盐平衡失调的基本特征。

因此，本文在西北“水三线”水资源空间管理战略构想基础上，尝试建立西北“水三线”的生态经济体系概念框架，探讨西北“水三线”生态经济枢纽区建设及其发展模式，明确不同枢纽区农业生态经济布局，旨在完善区域生态经济理论体系和生态文明建设支撑体系。

1 西北“水三线”自然地理特征

西北“水三线”是从地形地貌、水文气象、生态景观和社会经济的梯度分布及空间分异特征，提出的自然地理与人文地理空间格局，由“胡焕庸线”“阳关线”和“奇策线”3条线组成，包含8个片区：奇策线西北、奇策线东北、奇策线西南、奇策线东南、河西内陆河流域、柴达木盆地、半干旱草原区和黄河流域片区（图1）。胡焕庸先生于1935年指出中国人口地理分布沿“爱辉—腾冲”一线（即被后世称道的“胡焕庸线”）呈现“东南半壁36%的土地供养了全国96%的人口，西北半壁64%的土地仅供养4%的人口”这一规律，被誉为中国的“九成线”。“阳关线”是沿“胡焕庸线”向西到敦煌市作一条大致平行线，是中国极度干旱区（年均降水量小于100 mm）与干旱区的地理分界线[19]。“奇策线”是以北疆的奇台县和南疆的策勒县为两点连线，将新疆划分为面积大致相等的东南半壁和西北半壁，西北半壁的水资源、人口、GDP、灌溉面积约占新疆的90%，以新疆“九成线”著称[19]。西北“水三线”总体上干旱缺水，沙漠（沙地）面积占比达34.9%，生态脆弱，但土地资源丰富、开发潜力大，能矿资源丰富，是我国能源重化工基地。“水三线”提出的目的是围绕国家重大战略需求，进行合理的水资源空间优化配置，巩固国家西部生态安全屏障，实现区域生态-经济协调发展。

2 西北“水三线”生态经济体系构建

2.1 西北“水三线”生态经济体系概念框架

本文借鉴Ostrom[20]的社会-生态系统部分理念，构建以生态系统、经济系统、社会系统和管控系统为核心子系统的西北“水三线”生态经济体系概念框架（图2），构建理论基础、调控路径、战略模式和生态经济枢纽区“四大”支撑体系，创立具有西北“水三线”地理空间格局特色的生态经济体系基本框架。

基于生态经济理论体系和区域生态评价，实施提升生态系统功能、科学管控生态足迹、提高生态承载能力、优化系统能值结构的生态-经济协调发展调控路径。

在上述理论和评价，提出未来西北“水三线”实现生态-经济协调发展的四大战略模式，即（1）调水改土与城乡统筹发展模式。依托规划中的南水北调西线工程，重新进行水资源空间配置，改造未利用土地和扩大发展空间，构建城乡统筹的第三模块。（2）占补平衡与飞地经济模式。依托南水北调西线工程，形成“水资源优化配置→农业后备资源开发→耕地占补平衡资源补充→粮食安全得到保障→生态经济新增长点形成→承担产业转移的能

图1　西北“水三线”及8个片区位置图

Fig. 1　Location of “three water-related lines” area and eight subregions in northwest China

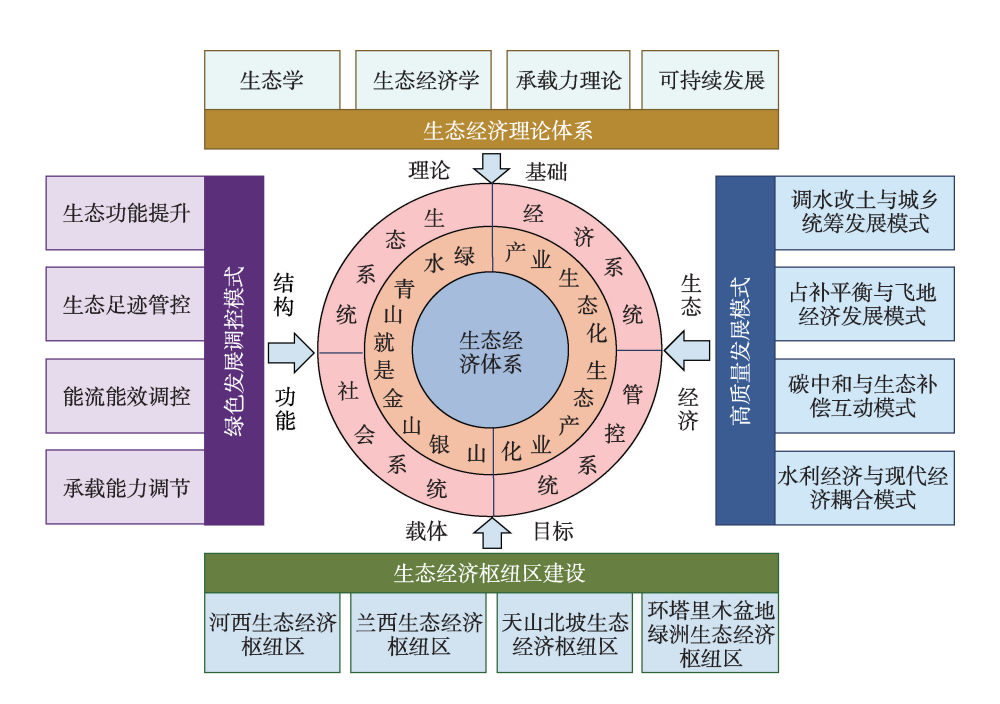


图2　西北“水三线”生态经济体系概念框架

Fig. 2　Framework of ecological-economic system in “three water-related lines” area in northwest China

力增强→飞地经济与区际互动合作”的良性运转链条。(3) 碳中和与生态补偿机制模式。依托水资源配置工程对生态环境的改善作用,形成“水资源优化配置→水土资源平衡组合→生态功能改善→碳汇功能增强→生态补偿机制建立→转移支付力度提升→受益区生态与收入良性循环→生态经济协同程度提升”的良性运转链条,将碳中和与生态补偿机制有机结合。(4) 水利经济与现代经济耦合模式。构建西部水网,形成“水资源优化配置→水利基础设施建设→水资源缺乏缓解→土地生产潜力得以开发→西北特色生态产业发展→农业产业布局优化→生态农业模式形成→水生态经济可持续性提高→区域水利经济持续发展→区域生态经济协同发展”的良性运转链条。

鉴于西北“水三线”水地总量不匹配、城乡发展不平衡不充分、水资源供需不平衡等现实,结合现有的天山北坡城市群、兰西城市群、河西走廊、环塔里木盆地等核心城市组团或具有成为西部经济强区和绿洲生态屏障功能潜力的城市布局,依照生态本底和自然禀赋,针对性开展上述四大战略发展模式的建设,逐步形成四大生态经济枢纽区,即(1) 河西生态经济枢纽区。以河西内陆河流域为依托,向东衔接关中城市群和“几字湾”城市群,其西部及东南部分别与其他三大生态经济枢纽区接壤,是贯通全域经济脉络的关键片区。(2) 兰西生态经济枢纽区。依托黄河流域的兰西城市群,以兰州、西宁为中心辐射带动周边,是连接“一轴”(陇海—兰新国家发展轴)与“两带”(若羌—格尔木—西宁城镇发展带和银川—包头—呼和浩特城镇发展带)的关键枢纽[21]。(3) 天山北坡生态经济枢纽区。依托奇策线西北的天山北坡城市群发展,是新疆社会经济发展的核心,具有“通东达西、承北启南”的地缘优势,同时具备自然资源与政策性倾向优势。(4) 环塔里木盆地绿洲生态经济枢纽区。依托奇策线东南和西南的封闭性山间盆地形成的喀什经济特区城市群、和田绿洲中心城市发展,以这些城市为极点进行环状布局。同时,其在西侧、东北侧、东南侧分别与中巴经济走廊、天山北坡生态经济枢纽区、兰西生态经济枢纽区连接,为西北“水三线”地区总体布局的形成起到了关键作用。关于四大生态经济枢纽区的定义、功能、理论和布局参见文献[21],不再赘述。

2.2 西北“水三线”生态经济体系子系统功能关系调控

西北“水三线”生态经济体系是一个复杂体系,在这个复杂体系中,生态系统与经济系统、社会系统以及管控系统之间既相对独立,又相互依赖、相互制约、相互影响。体系内的经济活动(如绿洲农牧业、山地碳汇林业、城乡统筹发展、水利经济与飞地经济等)受到自然系统各圈层的约束和影响,资源系统(光热资源、水土资源、生物资源、能矿资源等)和绿洲系统是人类社会赖以生存和社会经济可持续发展的物质基础和必要条件,通过发展满足人类对物质产品和生态产品的需求、实现人类福祉;经济活动直接或间接给自然系统各圈层施加了压力,自然系统承受压力后进行各种响应和调整,但同时产生了很多负效应,如土壤侵蚀、水资源过度利用、草地超载过牧、气候变化、生物多样性损失等。

社会系统利用已有的资本、技术、知识和信息储备以及政治、文化和宗教等手段,通过管控体系(如市场调节、法律调控、资源配置和空间管制等)调节经济系统对自然资源的利用,并通过特定模式(如水土资源时空配置、生态农牧业与碳汇林业、城乡统筹、水利经济和飞地经济等)实现对生态经济体系的合理调控(图3)。

3 西北“水三线”农业生态经济体系

3.1 农业生态经济评价

3.1.1 承载能力评估 西北“水三线”生态足迹包含农业用地、牧业用地、林地、建设用地和水域面积5类[22],其中生态压力指数=生态足迹/承载力,生产和消费数据采用2000—2018年各省市的统计年鉴数据。如表1所示,区域平均生态压力指数由2000年的0.887增加到2018年的2.216,这表明西北“水三线”生态安全从2000年安全状态转变为2018年的不安全状态,全区处在生态赤字状态,生态风险增加,碳足迹是主要的驱动力(图4)。

2000—2018年“奇策线”两侧地区生态足迹总量和人均分别增长了172.4%和114.6%,生态承载力总量和人均分别增长了36.8%和7.7%,生态压力净增长了99.1%。“阳关线”至“胡焕庸线”生态足迹总量和人均分别增长了186.2%和149.5%,生态承载力总量增长3.5%,人均承载力下降了9.8%,生态压力

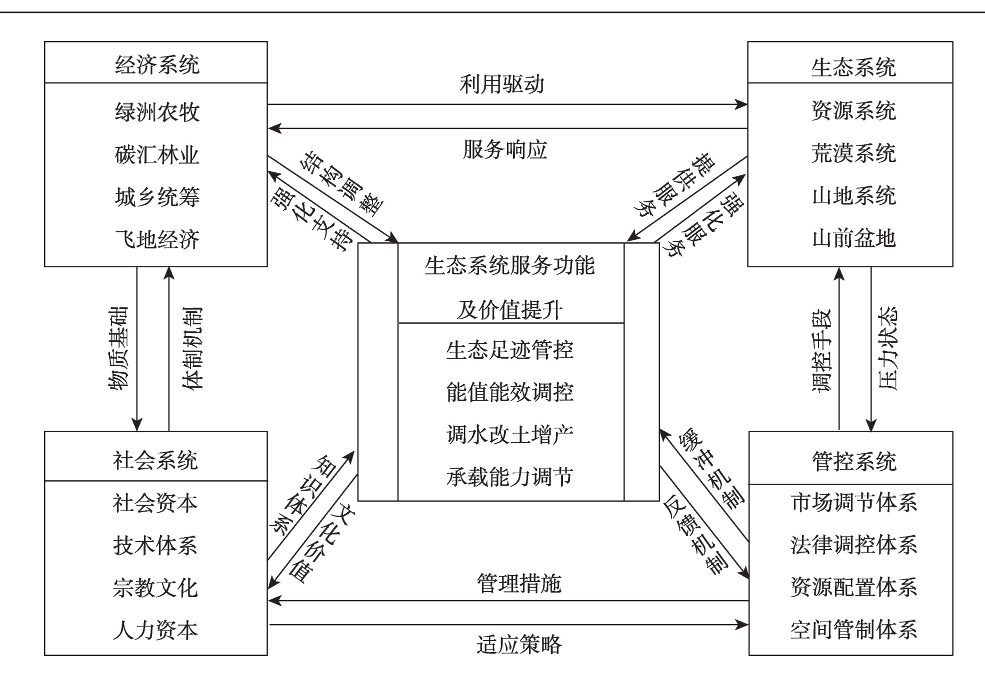


图3　西北“水三线”生态经济体系功能关系调控图

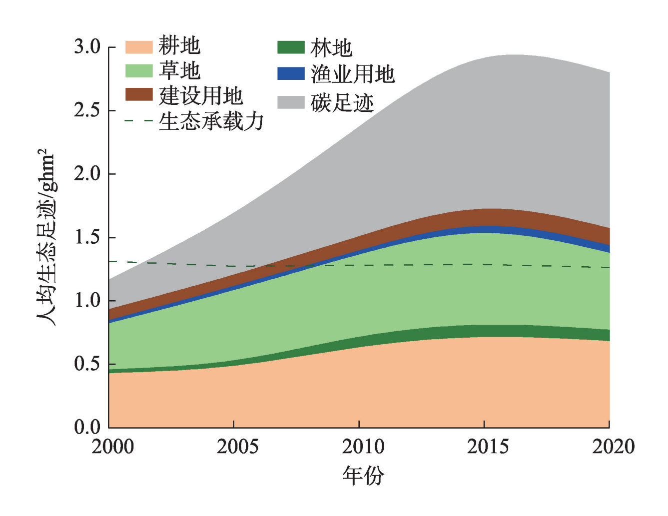
Fig. 3　Functional relationship regulation of ecological-economic system in “three water-related lines” area in northwest China

表1　西北“水三线”生态平衡计算分析

Tab. 1　Ecological balance calculation in “three water-related lines” area in northwest China

年份	生态足迹 /10^8 ghm^2	生态承载力 /10^8 ghm^2	生态赤字 /10^8 ghm^2	人均生态足迹 /ghm^2	人均生态承载力 /ghm^2	人均生态赤字 /ghm^2	生态压力指数
2000	1.033	1.165	0.132	1.163	1.312	0.149	0.887
2005	1.584	1.193	−0.391	1.691	1.273	−0.418	1.328
2010	2.320	1.255	−1.065	2.368	1.281	−1.087	1.849
2015	2.958	1.308	−1.650	2.912	1.288	−1.625	2.262
2018	2.911	1.314	−1.597	2.797	1.262	−1.535	2.216

注：ghm^{2}为全球公顷。



注：ghm^{2}为全球公顷。

图4　西北“水三线”人均生态足迹及其组分变化

Fig. 4　Changes of per capita ecological footprint and its component in “three water-related lines” area in northwest China

净增长了176.5%（图5）。

3.1.2　能值分析　能值分析将农业生态系统和社会经济系统看作一个耦合系统，把自然系统光、热、水、气等资源消耗和自然土壤损耗与社会经济系统的资源能源消耗一并纳入系统分析中，并将其换算成统一的衡量标准—能值（sej）进行系统分析[23]。农业生态经济系统能量和能值计算分析遵循能量守恒定理，即农业系统的产出与各类资源输入之和相等[23]，如图6输入端（系统边界左端和上端）和输出端（系统边界右端）的能值相等，并依此进行主要能值分析计算。图6中，自然系统可更新和不可更新资源以及社会经济资源输入能值（sej）=能量（j）或质量（g）×能值转换率（sej·j^{-1}或sej·g^{-1}），其中能值转换率采用已有成果[24–26]。

（1）自然系统能值流输入。2000年以来西北

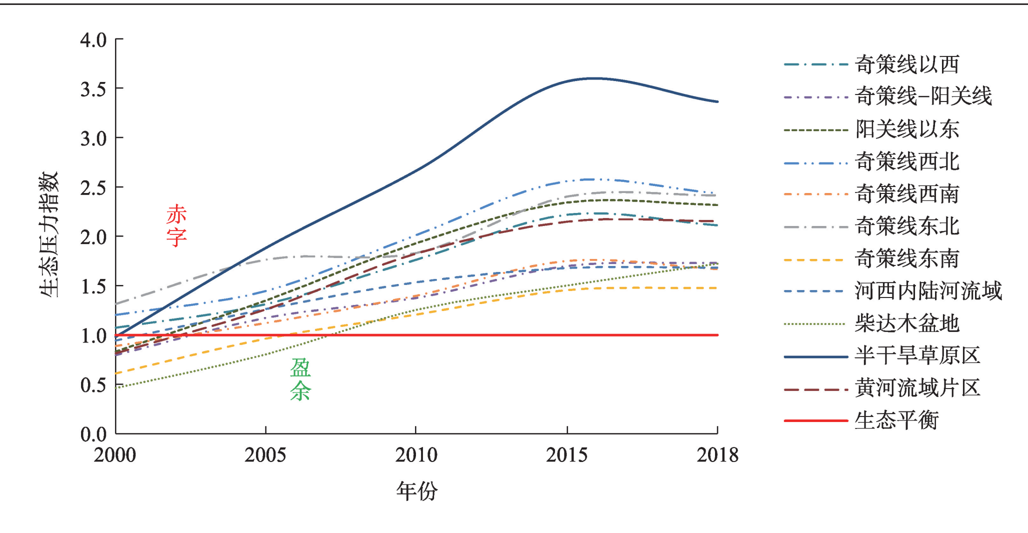
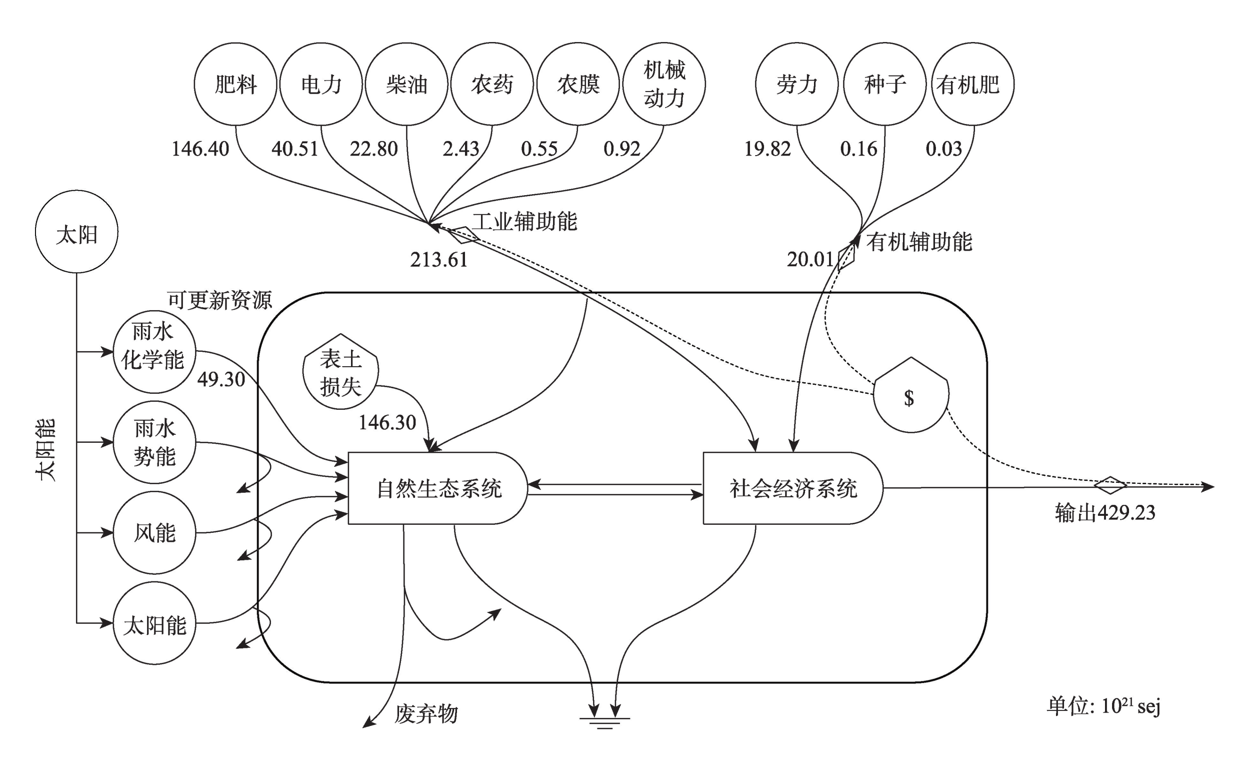


图5 西北“水三线”分区生态赤字/盈余变化

Fig. 5 Changes of ecological deficit/surplus in “three water-related lines” area in northwest China



注：sej表示太阳能值焦耳。

图6 2018年西北“水三线”农业生态经济系统能流耦合关系

Fig. 6 Coupling relationship for energy-flow of agricultural system in the “three water-related lines” area in northwest China in 2018

“水三线”自然资源多年均值为4.95×10^{22} sej，占能值总量的12.8%，占比逐年减小，长远来看，可更新资源占比较高的系统在经济压力下更宜生存。2000—2018年西北“水三线”因工业辅助能和有机辅助能增长较快，可更新资源占比有所减少，表土损失占比从44.7%减小到34.1%(图7)。

（2）经济系统能值流输入。无机辅助能中化肥占比从2000年的77.0%下降到2018年的68.5%，电力从9.5%增加到19.0%，农膜和机械动力分别从0.3%和0.1%增加到0.4%和0.3%(图8)。西北“水三线”农业系统主要依靠化肥和电力(取水灌溉)来维持，大量使用化肥以及农膜增加土壤理化性能恶化风险。相反有机辅助能比重从2000年的6.5%减小到2018年的4.7%(图7)，系统自我维持能力较弱。

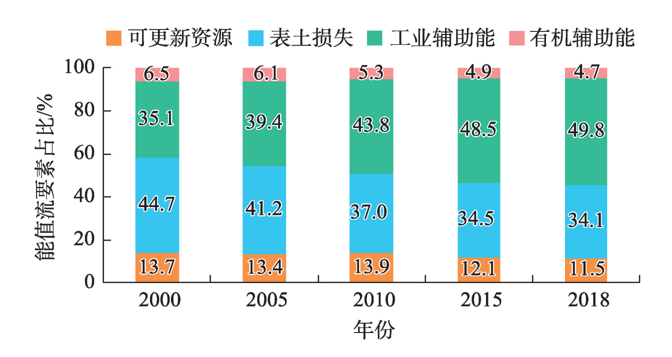


图7 西北“水三线”能值流要素占比

Fig. 7 Proportion of energy-flow elements in “three water-related lines” area in northwest China

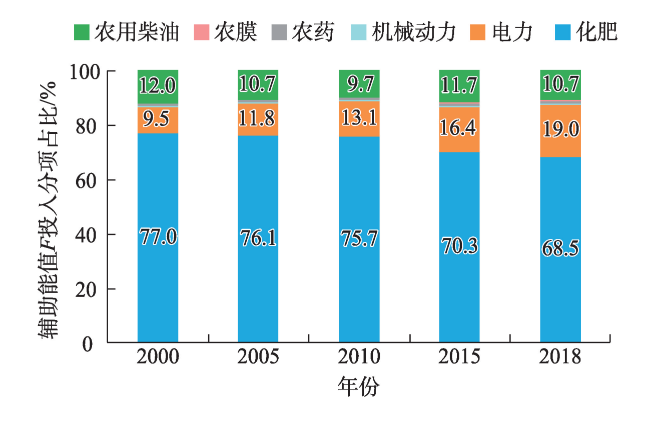


图8 西北“水三线”辅助能值F投入分项占比

Fig. 8 Proportion of auxiliary energy F input in “three water-related lines” area in northwest China

3.2 农业生态经济布局与模式

3.2.1 空间布局 西北“水三线”地区属于典型的生态脆弱区，而棉花、大豆、油料生产却占全国一半以上，是苹果、葡萄等水果重点生产地，又集中了全国5大牧场，面临生产和保护的双重压力，因此本文考虑西北“水三线”人类-自然的相互作用规律，以及农业生态经济系统结构、过程、功能和服务的异质性，针对性制定农业生态经济战略布局(图9)，确定可持续的农业发展路径和适宜的农业生态经济模式。在黄河流域建设旱地农业模式；在河西内陆河流域、柴达木盆地、奇策线东北、奇策线东南和奇策线西南建设绿洲农业模式；在奇策线西北、河西内陆河流域的祁连山、黄河流域的贺兰山、六盘山建设山地草原畜牧业模式；在半干旱草原区建设荒漠草原畜牧业生产以及农牧结合型模式；河西内陆河流域、柴达木盆地、奇策线东北、奇策线东南、奇策线西南以及奇策线西北除伊犁盆地外的全部地区是绿洲农业模式核心发展区，这些地区降水稀少，水资源自身不足以支撑农业系统[27-29]，但可开发耕地潜力巨大[30]，如果能够成功解决当地水资源的制约问题，这些地区将在中国国家粮食安全方面担起非常重要的角色。

3.2.2 旱地农业(雨养农业)模式 主要范围为年均降水量250~600 mm的黄河流域片区干旱半干旱地带，包括陇西黄土丘陵沟壑区、湟水谷地上游、海南高原山地、肃南高原北部、晋陕黄土高原北部、鄂尔多斯高原东部、太行太岳山地、汾渭平原、延隰黄土丘陵、陇中黄土高原南部和海北、门源山谷滩地、渭北高原、陇东陇西黄土高原等地区。

这些地区以发展集雨农业为主，主要路径是以提高降水资源利用率为根本目标，以“纳、蓄、集、保、截、节”为基本手段，实施坡改梯和集雨工程，推行中国特色的旱地农业模式[28,31-32]。功能上以涵养水源、保持土壤为主的生态调节功能和农牧林果产品提供功能为主(表2)。

3.2.3 绿洲灌溉农业模式 主要范围为年均降水量小于250 mm的地区，包括旱区(年均降水量小于200 mm)河西内陆河流域、奇策线东北和奇策线东南、奇策线西南以及奇策线西北除伊犁盆地外的全部地区，以及偏旱的半干旱草原区(年均降水量200~250 mm)，东起呼伦贝尔高原，向西南延伸到柴达木盆地。典型的绿洲区包括奇策线西北的北疆盆地区、奇策线西南和奇策线东南的南疆盆地区、河西内陆河流域、柴达木盆地。

干旱半干旱区绿洲农业模式以山地-绿洲-荒漠系统为基本结构，优化绿洲农业种植-养殖-林业比例关系，以及种植业内部的粮食-经济作物-其他作物比例关系，发挥各绿洲特点和充分利用其优势。畜牧业要充分利用绿洲区丰富的草场资源，发展牧草养殖业，减少养殖业的无机能投入，其他作物中绿肥和饲草种植面积应当保持一定比例，可以发展畜牧业，拉动种植业、促进加工业，拉长产业链，以满足绿洲农业内部生态良性循环的要求。功能上以防风固沙为主的生态调节功能和粮棉产品供给功能为主(表3)。

3.2.4 山地草原畜牧业模式 主要范围在降水量250~400 mm的半干旱区，包括奇策线西北的天山西部、天山北麓、阿尔泰山以及塔尔巴哈台山、乌尔卡沙尔山、沙乌尔山等地，以及河西内陆河流域的祁

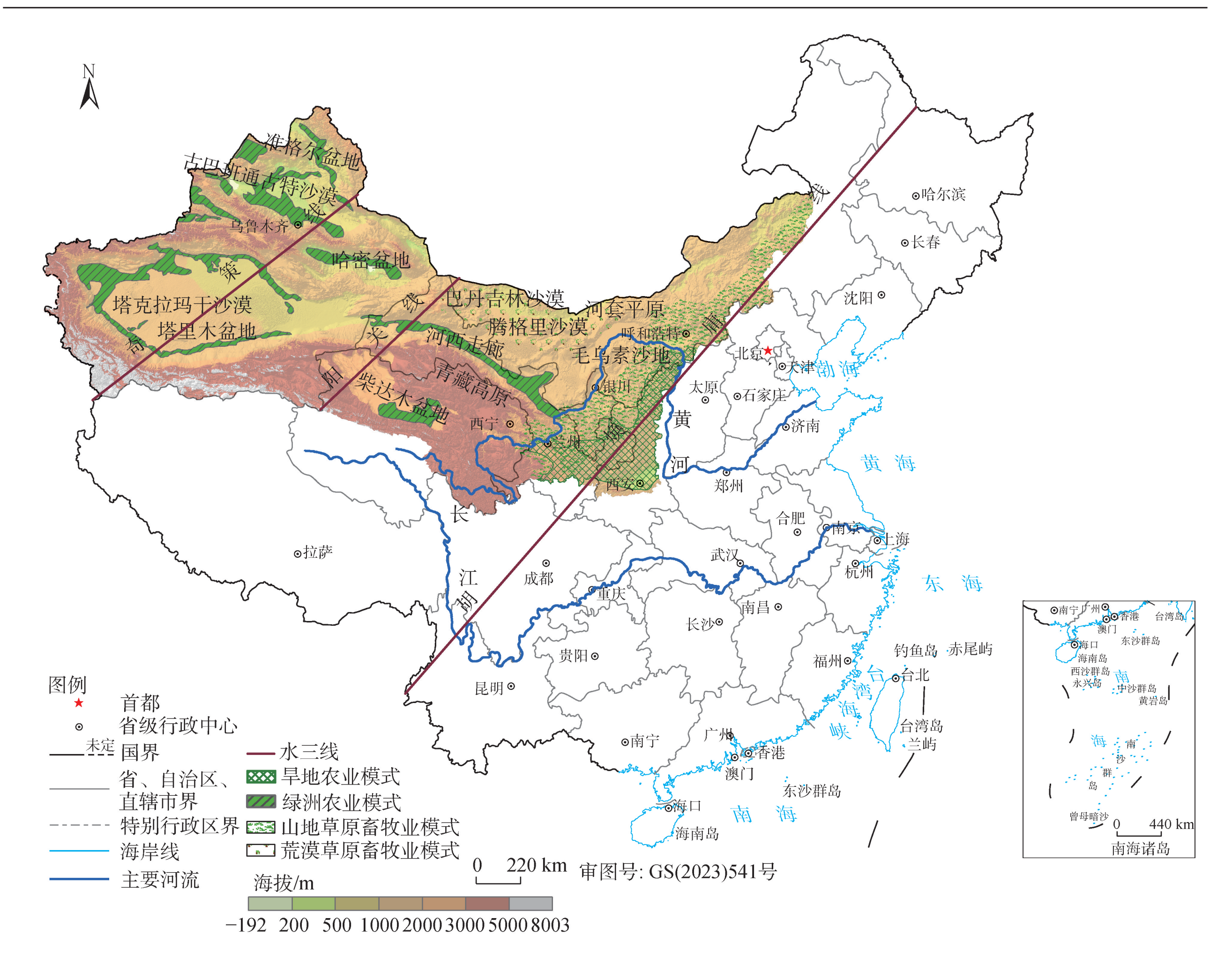


图9 西北"水三线"农业生态经济空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of agricultural ecological-economy in "three water-related lines" area in northwest China

表2 旱地农业模式结构及功能体系

Tab. 2 Production structure and functional system of modern dryland farming

类型区	年均降水量/mm	作物水分盈余量/mm	主要结构	主要功能
半干旱区	250~400	−60~20	农牧交错型牧业+集雨型种植业+保护性林业	调节:保持土壤,涵养水源,调节气候 供给:粮果牧产品,淡水资源
半湿润偏旱区	400~500	20~110	集雨型种植业+舍饲养殖业+经济型林业	调节:保持土壤,涵养水源,调节气候 供给:粮果牧产品,淡水资源
半湿润区	500~600	>110	节水型种植业+舍饲养殖业+经济型林业	调节:保持土壤,涵养水源,调节气候 供给:粮果牧产品,淡水资源

表3 绿洲农业模式结构及功能体系

Tab. 3 Production structure and functional system of modern oasis farming

类型区	年均降水量/mm	作物水分盈余量/mm	主要结构	主要功能
干旱区	<200	<−220	防护型林业+草地畜牧业+典型绿洲农业	调节:防风固沙,调节气候 供给:畜牧和粮棉产品
半干旱偏旱区	200~250	−130~−100	草地畜牧业+牧用型林业+边际种植业	调节:防风固沙,调节气候 供给:畜牧产品

连山，黄河流域的肃南高原、贺兰山、六盘山、陇山等地区。

该模式采取草地放牧+秸秆舍饲养殖结合的方法，山上繁殖，山下育肥，将山上的牧区畜牧业与山下的农区种植业相结合，充分利用农区丰富的植物秸秆和饲料用粮的优势，从根本上解决山区人们的生产、生活对自然资源的过度依赖，减轻或消除对草原的破坏。功能上以山区森林和草地涵养水源、保持土壤等生态调节功能和畜牧产品供给功能为主。

3.2.5 *荒漠草原农牧业模式* 主要范围分布在奇策线东北、河西内陆河流域和半干旱草原区，年均降水量为130~400 mm，包括河西走廊中段、内蒙古中部和新疆东北部、阿勒泰山南麓、准噶尔盆地北缘、宁夏中北部和东部、内蒙古察哈尔右翼前旗等，以及大致沿“胡焕庸线”农牧交错区。

荒漠草原区实施“草地+秸秆农牧结合型”畜牧业模式。农林牧综合发展有利于资源多样化配置，农牧交错带光热、生物和土地资源丰富，有大面积的草场和宜林地，发展农牧结合型产业是非常有效的模式。绿洲区实施“灌区农耕+秸秆饲料+舍饲养殖”可持续利用模式，以水浇地规模决定家畜的持有量。半干旱偏旱区实施“人工草地+天然牧草+放牧养殖”可持续发展模式，以天然草原承载力决定家畜的持有量。半干旱区实施“农林草+舍饲养殖与放牧结合+农牧”复合模式，以天然草原、林地、水浇地和耕地规模共同决定家畜量。该模式功能以防风固沙、保持土壤为主的生态调节功能，保障农牧产品提供为主的供给功能(表4)。

表4　荒漠草原农牧业模式结构及功能体系

Tab. 4　Production structure and functional system of modern desert-grassland livestock farming

类型区	年均降水量/mm	主要结构	主要功能
干旱区	<200	绿洲农耕+秸秆饲料+舍饲养殖	调节：防风固沙；供给：畜牧产品
半干旱偏旱区	200~250	人工草地+天然牧草+放牧养殖	调节：防风固沙；供给：畜牧产品
半干旱区	260~450	农林草+舍饲养殖与放牧结合+农牧	调节：保持土壤，涵养水源；供给：农林畜牧产品，淡水资源

4　结　论

在系统梳理生态经济理论与实践基础上，构建了西北地区生态经济体系概念框架，提出了四大发展模式和四大生态经济枢纽区建设，取得了如下基本的认识：

(1) 西北“水三线”生态经济体系是由区域生态系统、经济系统、社会系统和管控系统的复合体系，这个概念框架是建设西北内陆生态经济枢纽区、实现区域生态-经济协调发展的主要理论支撑体系。

(2) 建设调水改土与城乡统筹、占补平衡与飞地经济、碳中和与生态补偿以及水利经济与现代经济耦合四大战略模式以及天山北坡、河西、兰西和环塔里木盆地绿洲四大生态经济枢纽区是西北“水三线”生态经济协调发展的关键。

参考文献(References)

[1] 李文华. 中国当代生态学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Li Wenhua. Contemporary ecology research in China[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[2] 李欢欢. 爱德华·哥尔德史密斯[J]. 世界环境, 2015(5): 95. [Li Huanhuan. Edward Goldsmith[J]. World Environment, 2015(5): 95.]

[3] Costanza R, Groot R D, Braat L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.

[4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis[R]. Washington: Island Press, 2005.

[5] Clark W C. Sustainability science: A room of its own[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(6): 1737-1738.

[6] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Sustainability science[J]. Science, 2001, 292(5517): 641-642.

[7] Kates R W. What kind of a science is sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(49): 19449-19450.

[8] Folke C, Biggs R, Norstrom A V, et al. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science[J]. Ecology and Society, 2016, 21(3): 41, doi: 10.5751/ES-08748-210341.

[9] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems[J]. Science, 2007, 317(5844): 1513-1516.

[10] Berkes F, Folke C, Colding J. Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

[11] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environ Change, 2006, 16(3): 253-267.

[12] 吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 等. 可持续生态学[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3401-3415. [Lü Yonglong, Wang Yichao, Yuan Jingjing, et al. The ecology of sustainability: Progress and prospect[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3401-3415.]

[13] 全国生态农业示范县建设专家组. 发展中的中国生态农业[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001. [Panel for Pilot Counties of Eco-agriculture in China. Developing eco-agriculture of China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.]

[14] Zhang J, Wang S, Pradhan P, et al. Untangling the interactions among the sustainable development goals in China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(9): 977-984.

[15] 潘家华. 新中国70年生态环境建设发展的艰难历程与辉煌成就[J]. 中国环境管理, 2019, 11(4): 17-24. [Pan Jiahua. Difficulty and glorious progress of ecological environment construction in 70 years of new China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(4): 17-24.]

[16] 严耕. 中国省域生态文明建设评价报告(ECI 2015)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015. [Yan Geng. Annual report on China's provincial eco-civilization index (ECI 2015)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2015.]

[17] Dang X, Sui B, Gao S, et al. Regions and their typical paradigms for soil and water conservation in China[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(4): 643-664.

[18] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19. [Liu Guobin, Shangguan Zhouping, Yao Wenyi, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19.]

[19] 邓铭江. 中国西北"水三线"空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1203. [Deng Mingjiang. "Three water lines" strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189-1203.]

[20] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. Science, 2009, 325(5939): 419-422.

[21] 张甜, 黄晓燕, 李鹏, 等. 西北"水三线"地区生态经济枢纽区基本理论与建设布局[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2154-2173. [Zhang Tian, Huang Xiaoyan, Li Peng, et al. Basic theories and construction layout of eco-economic pivotal zones in northwest China based on "three water lines" strategy[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2154-2173.]

[22] Rees W, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy[J]. Focus, 1996, 6(2): 45-60.

[23] Odum H T. Environmental accounting: Eemergy and environmental decision making[M]. Ottawa: Library of Congress, 1996.

[24] Cohen M J. Systems evaluation of erosion and erosion control in a tropical watershed[M]. Gainesville: University of Florida, 2003.

[25] Brown M T, Ulgiati S. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments[J]. Population and Environment, 2001, 22(5): 471-501.

[26] Dang X H, Liu G B. Emergy measures of carrying capacity and sustainability of a target region for an ecological restoration programme: A case study in Loess Hilly Region, China[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 102: 55-64.

[27] Zhou L, Yang G. Ecological economic problems and development patterns of the arid inland river basin in northwest China[J]. Ambio, 2006, 35(6): 316-318.

[28] 邓铭江, 李湘权, 龙爱华, 等. 支撑新疆经济社会跨越式发展的水资源供需结构调控分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 379-390. [Deng Mingjiang, Li Xiangquan, Long Aihua, et al. Regulation of supply and demand structure of the water resources and support economic and social leap-forward development of protection measures[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3): 379-390.]

[29] 张宁, 汪子晨, 杨肖, 等. 新疆水资源与农业种植系统耦合协调及时空差异研究——以粮食和棉花种植系统为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 349-359. [Zhang Ning, Wang Zichen, Yang Xiao, et al. Coupling coordination and spatiotemporal differences between water resources and agriculture cropping system in Xinjiang: A case of grain and cotton cropping systems[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 349-359.]

[30] 毕玮, 党小虎, 马慧, 等. "藏粮于地"视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 235-243. [Bi Wei, Dang Xiaohu, Ma Hui, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of "Food Crop Production Strategy based on Farmland Management" in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 235-243.]

[31] 黄占斌, 山仑. 论我国旱地农业建设的技术路线与途径[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 1-6. [Huang Zhanbin, Shan Lun. A study on technology line and approaches of dryland farming construction in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(2): 1-6.]

[32] 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991. [Li Yushan, Su Shanmin. A comprehensive research on ecological and economic system in Wangdonggou small watershed, Changwu County[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1991.]

Ecological-economic system and paradigms of “three water-related lines” area in northwest China

DANG Xiaohu[1], DENG Mingjiang[2,3], LI Peng[3,4], CAO Xiaoshu[5,6], SUI Boyang[1], SHI Peng[3,4], ZHANG Tian[5,6], AI Zemin[7]

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Engineering Research Center of Water Resources and Ecological Water Conservancy in Cold and Arid Area of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 5. Northwest Land and Resources Research Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 6. Key Laboratory for Urbanization and Environment Simulator in Northwest China, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 7. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In the contexts of the national strategies for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, as well as of the new era of development in western China, it is necessary to alter the ecological conditions and resource endowment of the “three water-related lines” area in northwest China (an area occupying two distinct basins of the Yellow River and the inland rivers) and to innovate a framework and paradigms for coordinated ecological-economic development specific to the area. Based on existing ecological-economics theories, as well as on the developing philosophy of “a benign environment equal to wealth” and the concept of the “human-nature community”, we propose a conceptual ecological-economic framework for the “three water-related lines” area, in which we identify the interactions between subsystems and their mechanisms and suggest four paradigms and four eco-economic hub areas. Further, we propose a layout for modern agriculture and indicate the pathway to coordinated urban and rural development in the four suggested eco-economic hub areas. We conclude that the proposed “three water-related lines” ecological-economic framework represents a theoretical foundation on which to base decisions concerning the layout of socio-economic development and ecological-environmental protection, the construction of ecological-economic hubs, and the overall harmonious ecological-economic development of northwest China.

Key words: “three water-related lines” area in northwest China; ecological-economic system; regulation paradigms; regional ecological-economic harmonization